

**TRAITEMENT D'IMAGES ERS-1 POUR LA  
PRÉVISION HYDROLOGIQUE -  
RAPPORT D'ÉTAPE**

**TRAITEMENT D'IMAGES ERS-1 POUR LA PRÉVISION HYDROLOGIQUE -  
RAPPORT D'ÉTAPE**

Rapport rédigé pour

**HYDRO-QUEBEC**

par

**Jean-Pierre Fortin  
Monique Bernier**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau  
2800, rue Einstein, Case postale 7500, SAINTE-FOY (Québec), G1V 4C7**

**Rapport de recherche No R-413**

**Juin 1994**



## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	iii
1 INTRODUCTION .....	1
2 ACTIVITÉS RÉALISÉES .....	3
2.1 Sélection d'un bassin représentatif et de sites expérimentaux .....	3
2.2 Acquisition des données .....	4
2.2.1 Commandes, lecture et affichage des images ERS-1 et des données auxiliaires .....	4
2.2.2 Campagnes de terrain .....	5
2.3 Préparation d'une demande CRSNG-Industrie .....	17
3 ACTIVITÉS PRÉVUES .....	19
3.1 Analyse des images ERS-1 .....	19
3.2 Stratégies d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige sur les bassins d'Hydro-Québec .....	20
4 CONCLUSION .....	21

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Description des sites expérimentaux .....	9
Tableau 2.2: Caractéristiques des images ERS-1 acquises .....	10
Tableau 2.3: Campagnes de mesures de l'hiver 1994 .....	11

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Localisation des sites expérimentaux .....	12
Figure 2.2: Relevés des températures du sol pour les campagnes de février et mars 1994 à LG4. ....	13
Figure 2.3: Evolution temporelle du profil du couvert nival à l'hiver 1994 ....	14
Figure 2.4: Evolution de la densité (a), de l'équivalent en eau (b) et de la résistance thermique (c) du couvert nival à quatre sites entre février et mars 1994 .....	15
Figure 2.5: Variation temporelle de la résistance thermique du couvert nival et de la température du sol pour quelques sites échantillons .....	16

# 1 INTRODUCTION

---

Suite aux discussions entreprises entre Hydro-Québec et INRS-Eau sur l'intérêt de vérifier le potentiel du radar pour estimer l'équivalent en eau du couvert nival sur les bassins d'Hydro-Québec, l'INRS-Eau débutait en décembre 1993 le projet de recherche actuel. L'objectif du projet est effectivement d'estimer les caractéristiques de la neige au sol par un radar à antenne synthétique à bord du satellite ERS-1 et éventuellement du satellite canadien RADARSAT, après son lancement au cours des premiers mois de 1995.

Dans ce premier rapport d'étape, nous ferons état des activités déjà réalisées, incluant la préparation d'une demande CRSNG-Industrie. Un résumé des activités prévues d'ici la fin du projet et un rappel de l'échéancier compléteront le rapport.



## **2 ACTIVITÉS RÉALISÉES**

---

### **2.1 Sélection d'un bassin représentatif et de sites expérimentaux**

Au début janvier, nous avons fait les démarches auprès du Centre canadien de télédétection pour connaître les orbites du satellite ERS-1 qui couvraient la Baie James durant l'hiver 1994 (Phase D). Il s'est avéré que deux orbites (18 et 40) couvraient la région, l'une à l'est de LG4, l'autre à l'ouest de LG3. Notons qu'une scène ERS-1 couvre un territoire de 100 km X 100 km et que la résolution spatiale initiale est de 30 m, chaque pixel représentant une surface rééchantillonnée de 12,5 m X 12,5 m.

Les 27 et 28 janvier 1994, M. Fortin et Mme Bernier se sont rendus à Montréal afin de sélectionner le site expérimental en compagnie du personnel du Service Prévisions. En fonction des facilités d'accès et des moyens logistiques disponibles, la scène à l'est de LG4 a été choisie (centre d'image: 54°,00' N 72°,12' O). Ce secteur d'une superficie de 85 km X 85 km est accessible en camion par une route qui se divise en deux tronçons, l'un se rendant au barrage de La Forge 1, l'autre à Brisay. Nous avons aussi profité de notre séjour à Montréal pour exposer les objectifs de ce projet, les méthodes d'acquisitions des données de terrain, ainsi que pour consulter le centre de documentation et la cartothèque de la Vice-présidence Environnement.

Par la suite, au moyen des documents cartographiques et des études d'impacts disponibles, 14 sites expérimentaux ont été pré-sélectionnés en fonction de la géomorphologie du terrain, de la topographie et de la couverture végétale. Le choix définitif des sites s'est fait lors de la première campagne de terrain en février 1994, 12 sites ont alors été retenus (tableau 2.1 et figure 2.1).

## 2.2 Acquisition des données

### 2.2.1 Commandes, lecture et affichage des images ERS-1 et des données auxiliaires

Le tableau 2.2 décrit les six images ERS-1 acquises durant la saison 1993-1994. Étant donné les changements successifs de phases du satellite ERS-1 en décembre 1993 et en avril 1994, ces changements impliquant des modifications de paramètres des orbites, les 6 images acquises proviennent d'orbites différentes selon les phases. Les images ont été acquises le jour à l'automne (phase C), la nuit à l'hiver (phase D) et le jour au printemps (phase E). De plus, les deux images du printemps sont décalées d'un degré de longitude vers l'ouest et ne couvrent que 50% du site expérimental.

Les images du 16 août et du 25 octobre 1993 ont été acquises (tableau 2.3) afin de pouvoir comparer le signal rétrodiffusé par les sites en hiver par rapport au signal rétrodiffusé par les mêmes sites sans couverture nivale (sol dégelé) ou avec une couverture de neige sèche et non stratifiée (sol gelé). Ces deux images serviront d'images de référence. Les images du 12 février et du 26 mars ont été acquises avant et après les relevés de terrain (tableau 2.3) parce que les images prévues, celles du 15 février et du 23 mars respectivement n'ont pas été retenues dans la programmation finale du satellite. Heureusement, les conditions météorologiques n'étaient pas significativement différentes des jours de relevés et il n'y a pas eu de précipitation entre les jours d'acquisition et les jours de relevés. Finalement, les deux dernières images représentent un couvert printanier en condition de fonte.

Jusqu'ici, les images ERS-1 ont été transférées de la bande magnétique au disque de notre système de traitement d'image EASI/PACE et visionnées afin de nous assurer de leur qualité. Leur traitement sera fait d'ici décembre 1994 (section 3.1).



### Données auxiliaires

Une image LANDSAT-TM de l'été 1987, couvrant la zone d'étude, a été empruntée à la Vice-Présidence Environnement. Cette image nous servira à localiser et à masquer les lacs ainsi qu'à identifier les tourbières, les secteurs de brûlis et autres couverts végétaux du secteur étudié. Nous emploierons également les photographies aériennes (1:10 000, 1:15 000, 1:20 000) fournies par le Service Prévision pour les secteurs longeant les axes routiers.

D'autre part, la Vice-Présidence Environnement nous fournira le modèle numérique d'altitude (MNA) au 1:250 000 du secteur (feuilles topographiques: 33 I, 33 H, 23 L, 23 E). Nous utiliserons les MNA pour corriger, au besoin, la radiométrie des images ERS-1 des effets topographiques et aussi pour corriger géométriquement les images de façon à les rendre superposables les unes aux autres .

De plus, nous aurons accès à l'Inventaire du capital nature (1:125 000) pour le même secteur. Cet Inventaire est disponible sous forme numérique (polygones) et contient différentes données sur le milieu physique dont le matériau géologique de surface, le couvert végétal, les classes topographiques, etc. Ces données serviront à l'analyse des images ERS-1.

### **2.2.2 Campagnes de terrain**

Nous nous sommes rendus à trois reprises à LG4 durant la saison 1993-1994: mi-février, fin mars, et début mai (tableau 2.3). Ces périodes coïncident, sauf pour la première, avec les dates des relevés nivométriques réguliers d'Hydro-Québec: 3 février, 17 mars, et 28 avril 1994. En effet, le laps de temps entre le début du projet et le 3 février était trop court pour nous permettre d'être logistiquement prêts à nous rendre sur le terrain la première semaine de février.

Lors du premier séjour (14-18 février 1994), messieurs Gauthier et Roy du Service Prévision accompagnaient monsieur Fortin et madame Bernier de l'INRS-Eau. Douze sites expérimentaux ont alors été sélectionnés, identifiés et photographiés. Afin de déterminer l'équivalent en eau de la neige, 20 carottes de neige par site ont été relevées. Celles-ci sont réparties sur deux transects d'environ 270 mètres et sont recueillies à tous les 30 mètres. En tout, 24 lignes de neige ont été effectuées. Sur chacune de ces lignes, la température du sol d'un point d'échantillonnage était notée pour une épaisseur donnée. La figure 2.2 présente les valeurs de températures mesurées en fonction de l'épaisseur du couvert. À première vue, le lien n'est pas évident. Ces données seront examinées en détails dans les prochains mois.

Lors de cette première campagne nous avons également effectué 8 profils du couvert nival (fosses) pour déterminer les paramètres suivants de la neige: l'épaisseur et la densité des couches, le type et la dimension des grains, la constante diélectrique, la teneur en eau et le profil de température. La figure 2.3 illustre les profils types du couvert nival (site 11) relevés lors des trois campagnes de terrain. La densité moyenne du couvert au site 11 était de  $250 \text{ kg/m}^3$  en février par rapport à  $270 \text{ kg/m}^3$  pour l'ensemble des profils. Le gradient thermique du couvert était important en février, soit  $13.6^\circ\text{C}$  et la température du sol était en-dessous du point de congélation, soit  $-1.6^\circ\text{C}$ .

Lors du deuxième séjour, messieurs Gauthier et Tremblay du Service Prévision accompagnaient le personnel de l'INRS-Eau. Un treizième site a alors été choisi. Des informations supplémentaires sur la végétation et la topographie de la région, ainsi que les coordonnées UTM des sites, ont également été recueillies. Nous avons aussi effectué 26 lignes de neige et neuf profils du couvert nival.

En comparaison avec le relevé précédent, nous avons constaté pour l'ensemble des sites une augmentation substantielle de l'épaisseur du couvert nival, d'où une augmentation de l'équivalent en eau et de la résistance thermique (figure 2.4). Cette résistance thermique (R) en  $^\circ\text{Cm}^2\text{sJ}^{-1}$  se définit ainsi:

$$R = \sum_i \left( \frac{h_i}{k_i} \right) \quad (1)$$

où  $h_i$  est l'épaisseur de chaque couche de neige en mètres et  $K_i$  est la conductivité thermique ( $J/^\circ Cms$ ) de la couche correspondante.

Quant à la température du sol au mois de mars, elle voisine  $1^\circ C$  pour l'ensemble des sites (figure 2.5). Cela reflète l'augmentation de la résistance thermique du couvert mais aussi un réchauffement des températures de l'air entre les deux dates. Effectivement le gradient thermique des profils a bien diminué, soit  $2,5^\circ C$  au lieu de  $13,6^\circ C$ , et les grains de neige ont été transformés par de la fonte (figure 2.3).

La dernière campagne a eu lieu au début mai, en période de fonte. Messieurs Raymond Gauthier d'Hydro-Québec et Yves Gauthier de l'INRS-Eau ont relevé les données sur la condition du couvert nival. Celui-ci était humide et plus dense qu'à l'hiver, bien que la quantité de neige au sol et la température du sol étaient généralement semblables à celles du mois de mars (tableau 2.3 et figure 2.5). L'augmentation de la densité du couvert s'est aussi traduite par une baisse de la résistance thermique par rapport au mois de mars.

Comme l'image ne couvrait que 50% du territoire précédent (section 2.2.1), de nouveaux sites ont été identifiés entre l'aéroport de Keyano et le pont Polaris: sites 14 et 15 (figure 2.1). De plus, étant donné que la neige était humide, seulement 11 lignes de neige ont été effectuées car le signal radar en bande C ne pénètre pas plus que quelques centimètres dans un couvert humide dont la teneur en eau volumique est de 4%. Cependant, la teneur en eau volumique mesurée au moment du passage de ERS-1 étant de l'ordre de 1%, la pénétration est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur moyenne du couvert, soit un mètre. La variation spatiale de la teneur en eau du couvert restant difficile à évaluer, il pourrait donc être impossible de tirer l'équivalent en eau de cette image radar. Toutefois, cette image et celle du 10 juin 1994 devraient permettre de suivre le processus de fonte en localisant les secteurs de neige mouillée, de neige sèche

et sans neige. Les informations tirées de ces images entrent donc dans une stratégie globale d'estimation de l'équivalent eau du couvert nival.

Tableau 2.1: Description des sites expérimentaux

Saison 1993/1994 - Baie James					
Site	Borne kilométrique	Coordonnées UTM	Végétation	Sol	Topographie
1	378.0 (1)	653781E 5970300N	Brulis	Till drainée	Plaine
2	388.8 (1)	662274E 5975005N	Boisé peu dense	Till drainée	Plaine
3	0.7 (2)	667517E 5985567N	Petits conifères	Till drainée	Vallons
4	397.0 (1)	669390E 5977690N	Boisé peu dense	Till drainée	Plaine
5	416.7 (1)	686181E 5982825N	Brulis et petit boisé	Esker	Plaine
6	431.9 (1)	305955E 5987251N	Boisé dense	Till drainée	Colline
7	438.2 (1)	311215E 5989336N	Brulis	Esker	Plaine vallonnée
8	446.7 (1)	318489E 5992499N	Brulis et boisé	Till drainée	Colline
9	18.1 (2)	664749E 5993264N	Boisé et tourbière	Wetlands	Plaine
10	20.7 (2)	662510E 5993909N	Tourbières	Wetlands	Plaine
11	28.8 (2)	660714E 6000639N	Boisé et clairière	Till drainée	Vallée
12	32.5 (2)	659551E 6002752N	Conifères peu dense	Till drainée	Colline
13	8.6 (2)	663863E 6086198N	Gravière et boisé	Till drainée	Colline

(1) Route LG4-Brisay

(2) Route LaForge

Tableau 2.2: Caractéristiques des images ERS-1 acquises

Saison 1993/1994 - Baie James				
Dates et heures d'acquisition	Coordonnées du centre d'image	Orbite relative	Type d'image	Dimension du pixel(m)
16 août 93, 10h49	54:00 N 72:12'O	240(DES)	SGF	12.5
25 oct. 93, 10h49	54:00 N 72:12'O	240(DES)	SGF	12.5
12 fév. 94, 21h50	54:00 N 72:12'O	18 (ASC)	SGF	12.5
26 mars 94, 21h50	54:00 N 72:12'O	18 (ASC)	SGF	12.5
4 mai 94, 11h15	54:00 N 72:56'O	2135 (DES)	SGF	12.5
10 juin 94, 11h15	54:00 N 73:05'O	255(ASC)	SGF	12.5

Tableau 2.3: Campagnes de mesures de l'hiver 1994

Hiver 1994 - Baie James				
Images ERS-1 acquises	Terrain	État du sol	État du couvert	Equivalent en eau moyen
16 août 93	-	Dégelé, peu de pluie depuis 7 jours	Pas de neige	-
25 oct. 93	-	gelé	Couvert sec	Inconnu
12 fév. 94	14-18 fév.	gelé	Couvert sec et stratifié	21.8cm
26 mars 94	21-24 mars	gelé	Couvert sec et stratifié	27.9cm
4 mai 94	2-5 mai	dégelé	Couvert humide et stratifié	26.6cm
10 juin 94	-	dégelé	Couvert très humide partiel	Inconnu

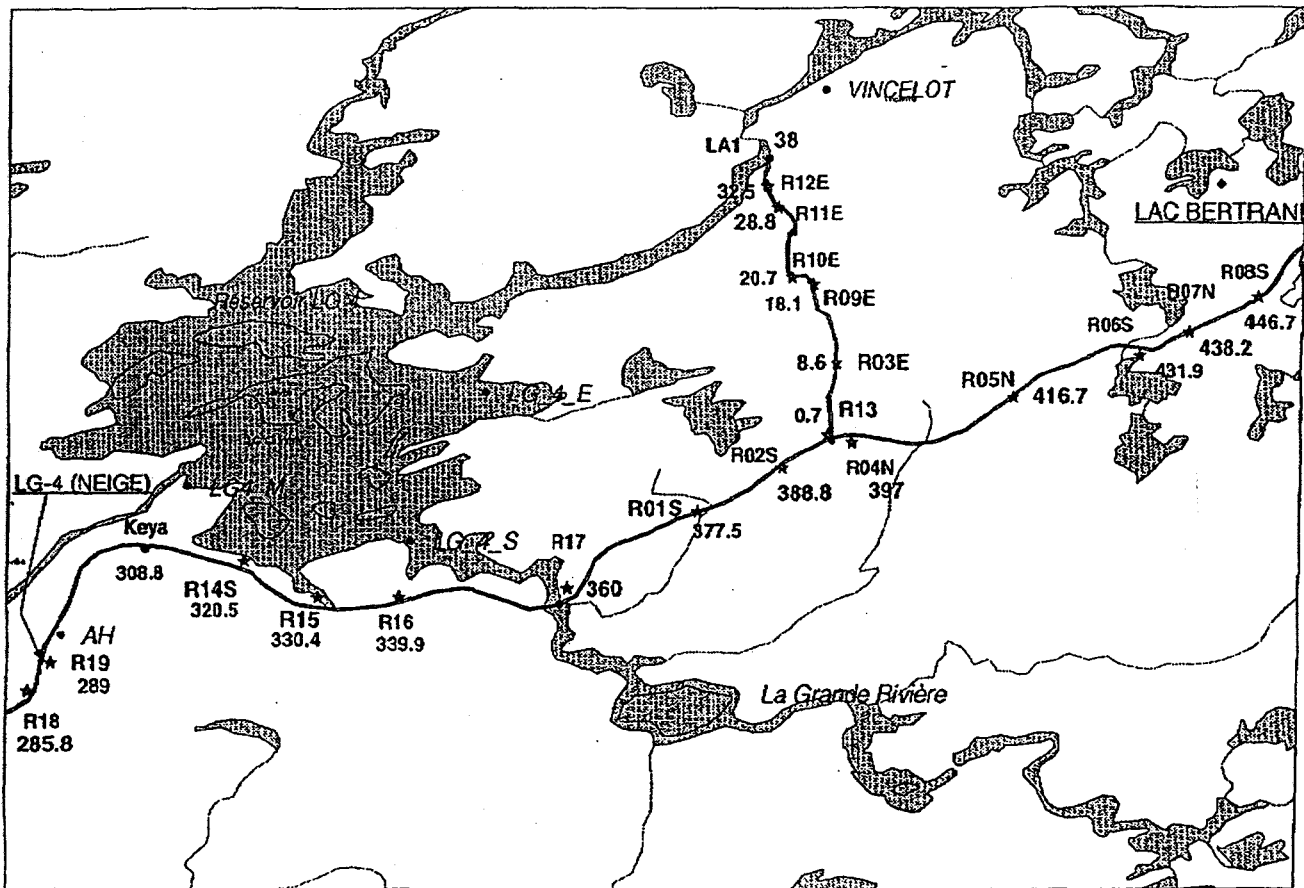


Figure 2.1 : Localisation des sites expérimentaux



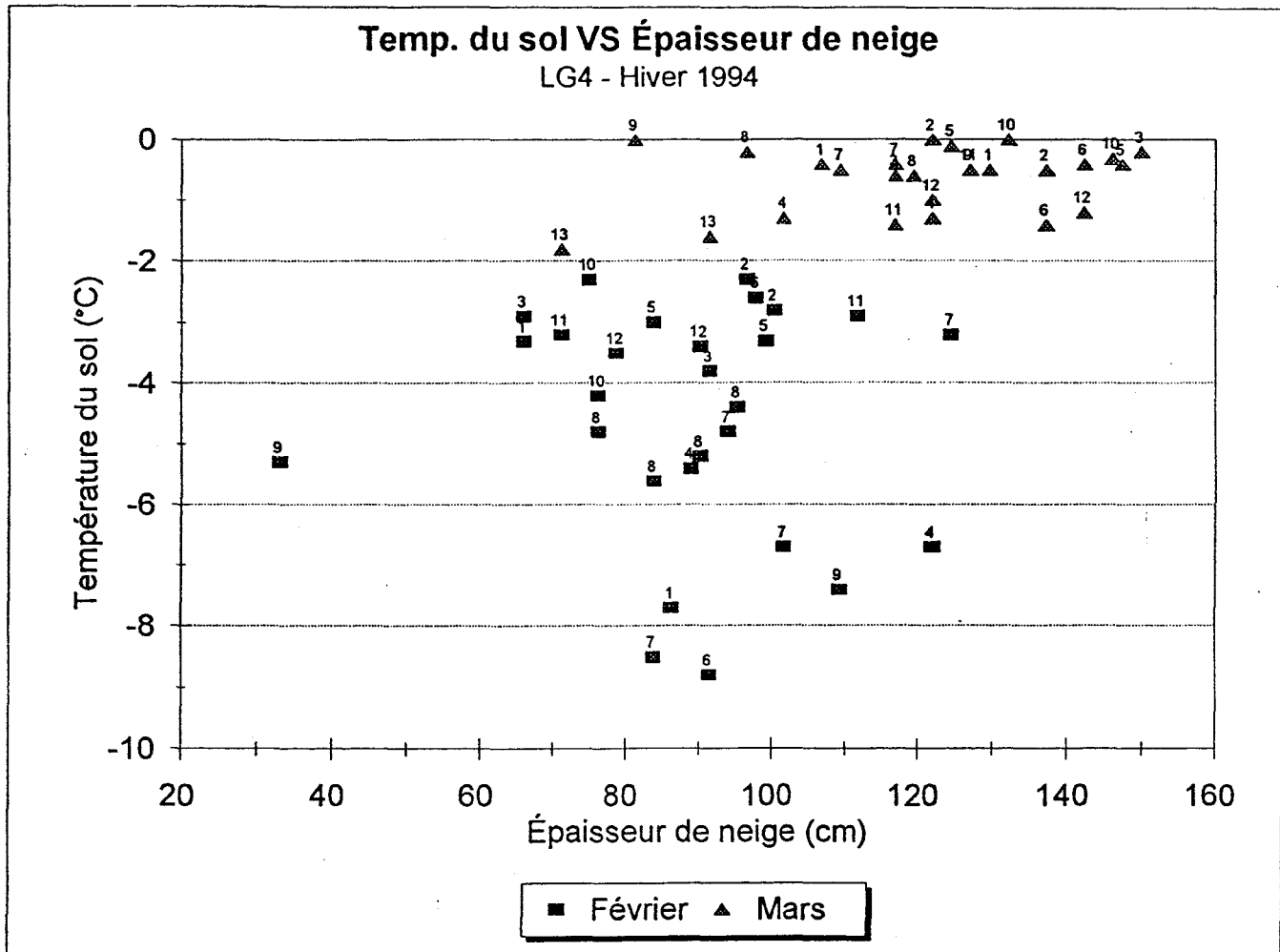
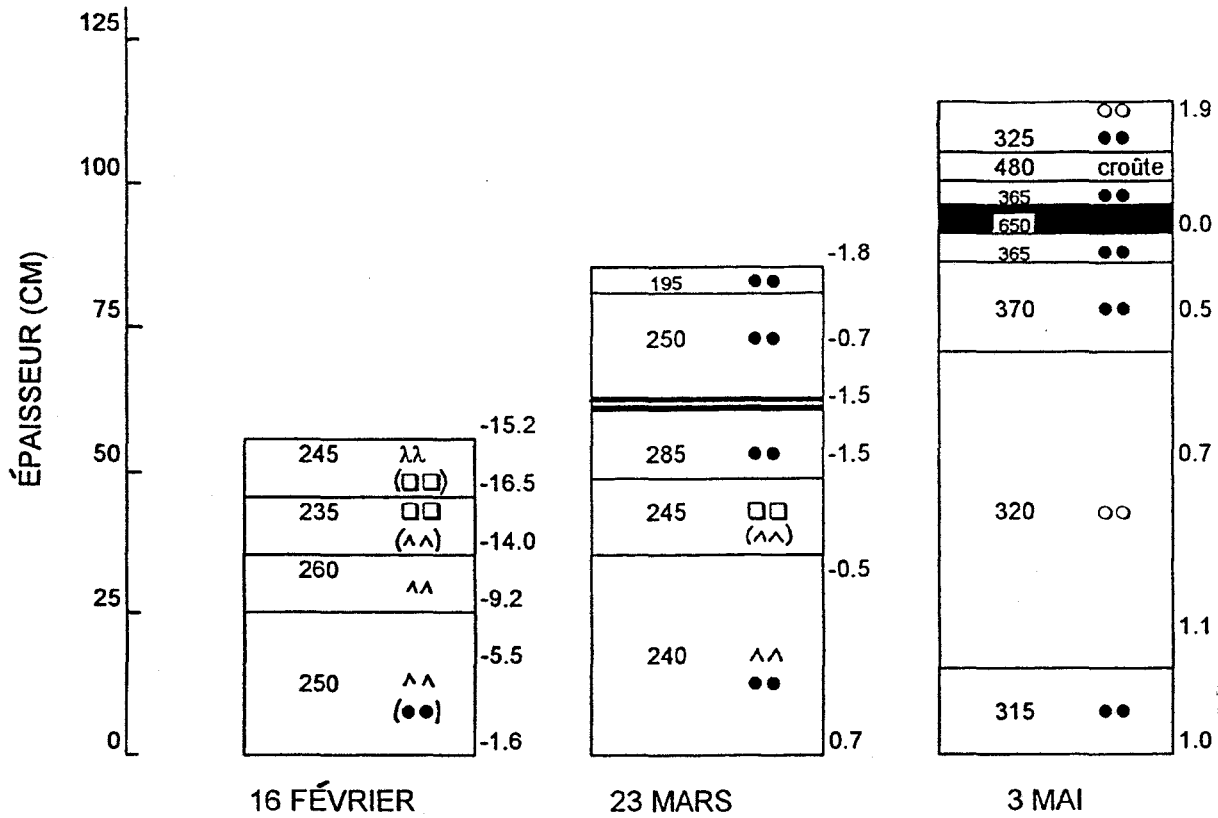


Figure 2.2: Relevés des températures du sol pour les campagnes de février et mars 1994 à LG4.

## PROFILS DE NEIGE DU SITE 11 LG4 - HIVER 1994



LÉGENDE	
λλ	neige poudreuse
□□	neige à facettes (grains irréguliers)
^^	neige à facettes (bâtonnets striés)
●●	neige transformée
○○	neige mouillée
■	glace
260	densité (Kg/m³)
-5.5	température (°C)

Figure 2.3: Evolution temporelle du profil du couvert nival à l'hiver 1994.

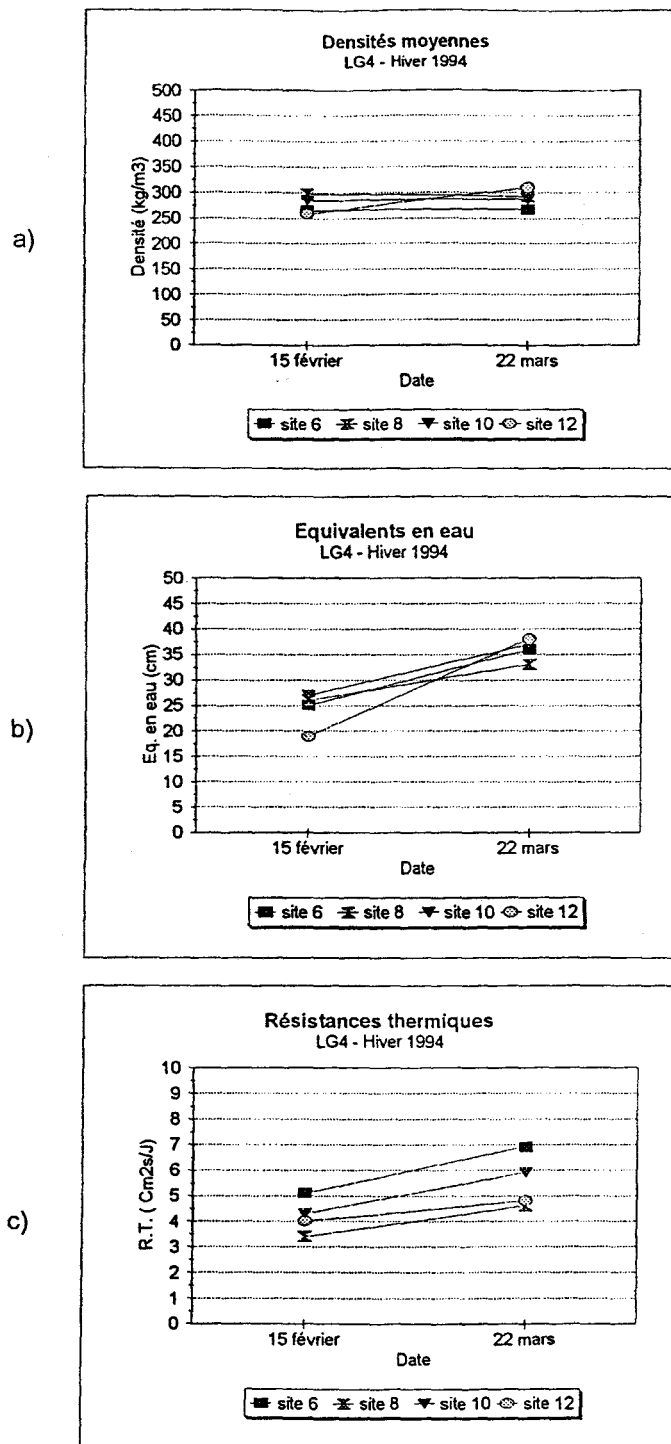


Figure 2.4: Evolution de la densité (a), de l'équivalent en eau (b) et de la résistance thermique (c) du couvert nival à quatre sites entre février et mars 1994.

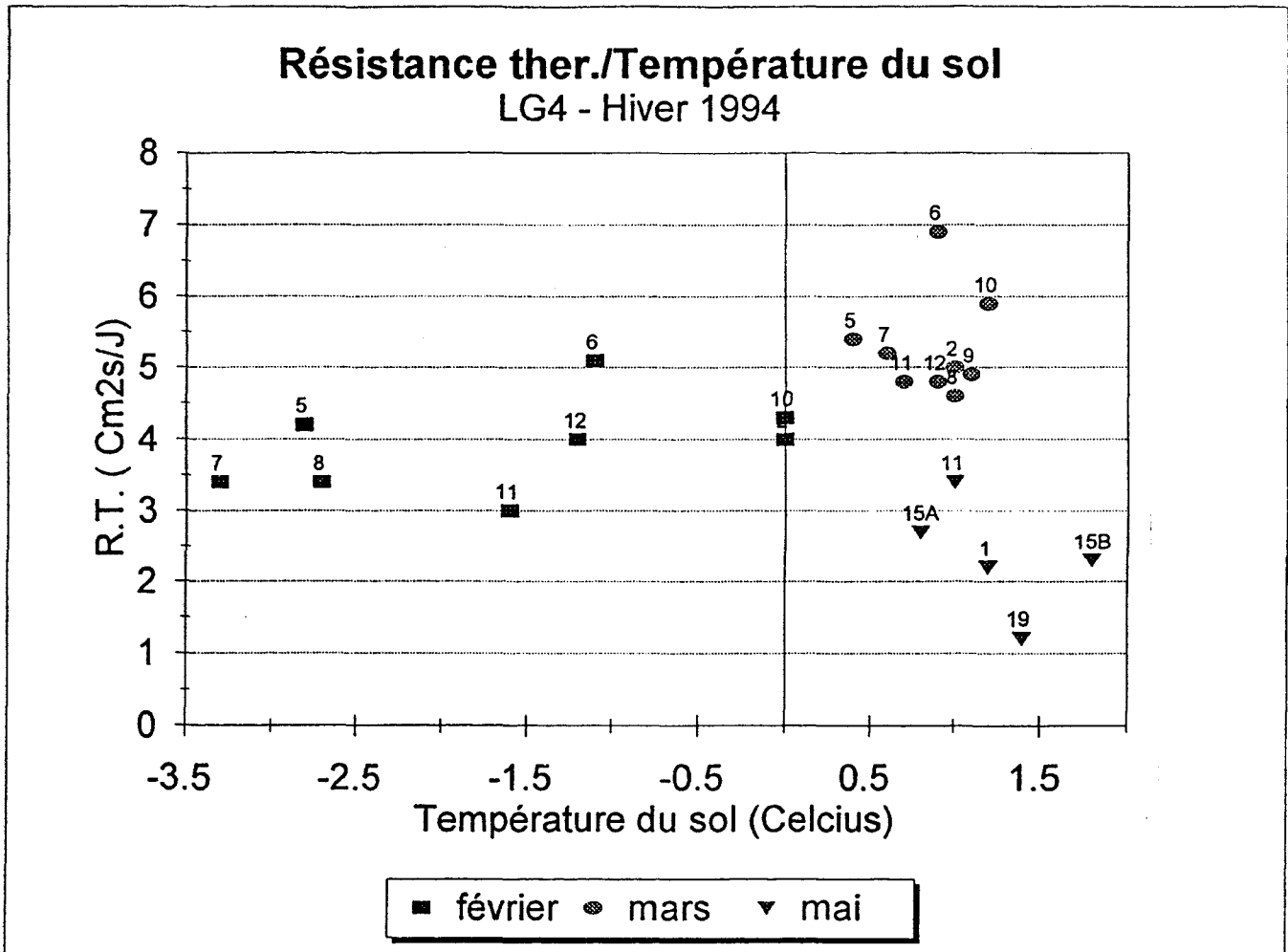


Figure 2.5: Variation temporelle de la résistance thermique du couvert nival et de la température du sol pour quelques sites échantillons.

## 2.3 Préparation d'une demande CRSNG-Industrie

Le programme de recherche proposé à Hydro-Québec se divise en deux phases. La Phase-I vise à vérifier le potentiel des capteurs actifs et passifs opérant dans les micro-ondes. Cette phase prendra fin en décembre 1995 en ce qui à trait au présent contrat avec Hydro-québec et en mars 1996 pour la subvention demandée au CRSNG. Quant à la Phase-II, elle portera sur l'intégration des informations fournies par ces capteurs, dans une stratégie opérationnelle d'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival sur les bassins d'HYDRO-QUEBEC. Les objectifs de la Phase-II seront précisés à l'aide des résultats obtenus dans la Phase-I. Les deux phases devraient se suivre dans le temps.

Selon cette problématique, les objectifs spécifiques de la demande de subvention au programme CRSNG-Industrie, datée de juin 1994, portent essentiellement sur la Phase-I et sont donc:

- (a) d'évaluer avec quelle précision les capteurs radar à bord des satellites ERS-1 et, éventuellement RADARSAT, pourront estimer l'équivalent en eau du couvert nival dans la région de la Baie-James;
- (b) de vérifier la transférabilité à la Baie-James et d'adapter, au besoin, l'algorithme utilisé dans les Prairies canadiennes pour estimer l'équivalent en eau du couvert nival à partir des données du capteur SSM/I opérant dans les micro-ondes passives.

Les activités du volet RADAR sont financées par Hydro-Québec et portent sur: (a) la sélection d'un bassin représentatif et de sites expérimentaux, (b) l'acquisition et le pré-traitement des données, (c) l'analyse des images ERS-1 (étalonnage, extraction des coefficients de rétrodiffusion, détermination des rapports de rétrodiffusion), (d) l'estimation de la résistance thermique et l'équivalent en eau des couverts de neige et (e) la stratégie d'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival sur les bassins d'Hydro-Québec.

Les activités du volet micro-ondes passives porteront sur: (a) l'analyse et la sélection d'algorithmes existants permettant d'estimer l'équivalent en eau du couvert nival à partir des données SSM/I, (b) l'acquisition et le pré-traitement des données SSM/I, (c) l'évaluation des algorithmes par comparaison avec les données au sol, (d) l'adaptation d'un algorithme à l'environnement de la taiga, en tenant compte du couvert végétal et du sol. Le financement de ces activités proviendra du CRSNG. Une copie de la demande de subvention a été remise à Hydro-Québec et fournit plus de détails sur l'approche suivie.

### **3 ACTIVITÉS PRÉVUES**

---

Au moment d'écrire ce rapport, nous ne savons pas si le satellite ERS-1 pourra fournir des données au cours de l'automne et de l'hiver prochains. Si des images peuvent être acquises, nous comptons retourner prendre des mesures de terrain afin d'obtenir un plus grand échantillon des conditions d'enneigement à la Baie-James. Les autres activités à réaliser sont celles qui étaient prévues, à savoir le traitement des images ERS-1 et l'établissement d'une stratégie d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige sur les bassins d'Hydro-Québec. Un rappel de ces activités est présenté dans les lignes qui suivent.

#### **3.1 Analyse des images ERS-1**

Les étapes suivantes sont toujours retenues pour réaliser l'analyse des images ERS-1: (a) étalonnage absolu, (b) extraction des coefficients de rétrodiffusion, (c) détermination des rapports de rétrodiffusion, (d) estimation de la résistance thermique des couverts de neige, (e) estimation de l'équivalent en eau des couverts de neige.

La première étape de l'analyse des images ERS-1 consistera à réaliser un étalonnage absolu de chacune des trois images acquises l'hiver dernier et d'une ou deux images de référence, afin de permettre leur analyse quantitative comparée. Les images de référence peuvent être sans neige ou avec un mince couvert de neige et le sol y sera gelé ou non. Comme image de référence, nous comptons utiliser l'image du 16 août ou du 25 octobre 1993, à moins qu'il soit possible de faire l'acquisition d'une nouvelle image à l'automne 1994. Ce traitement comprend une correction pour la variation transversale du signal (perte d'intensité du signal en fonction de l'éloignement du satellite et variation du patron d'antenne avec l'angle d'incidence), ainsi que l'utilisation d'une constante de proportionnalité ou constante d'étalonnage, pour transformer l'intensité moyenne de l'image en coefficient de rétrodiffusion.

Après étalonnage, on transposera chacune des scènes ERS-1 dans la projection UTM en utilisant le Modèle numérique d'altitudes et un algorithme de correction géométrique des images. Par la suite, on procédera à l'extraction des coefficients moyens de rétrodiffusion en provenance de chaque site expérimental.

L'étape suivante consistera à déterminer, pour chaque site expérimental et pour chaque date, le rapport des puissances entre l'image d'hiver et l'image de référence. Ce rapport sera très près de 1 si la neige n'a pas d'effet significatif sur le signal et sera différent de 1 si la neige a un effet.

Nos études antérieures ont démontré qu'il existait une relation entre le rapport des puissances moyennes des sites expérimentaux et la résistance thermique du couvert de neige sur ce site, à une date donnée. On déterminera donc tout d'abord la résistance thermique du couvert de neige, puis la relation entre la puissance de rétrodiffusion et la résistance thermique.

Enfin, comme la résistance thermique et l'équivalent en eau du couvert de neige sont tous deux des fonctions de l'épaisseur et de la densité de la neige, il sera possible d'établir une relation entre ces deux caractéristiques du couvert pour une densité donnée. Pour ce faire, on tiendra compte de l'occupation du territoire particulière des bassins du nord et des bases de données à référence spatiale disponibles à Hydro-Québec.

### **3.2 Stratégies d'estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige sur les bassins d'Hydro- Québec**

La méthodologie mise au point sur les sites expérimentaux servira de base à l'élaboration d'une stratégie d'évaluation de l'équivalent en eau du couvert de neige partout où c'est possible sur un bassin versant, de façon à en déduire la répartition spatiale sur l'ensemble de ce bassin. On utilisera à la fois les informations déduites de la télédétection et celles provenant des données au sol (lignes de neige ou épaisseurs aux stations). En outre, on tiendra compte de la fréquence d'observation par des capteurs radar à bord de satellites et des informations complémentaires pouvant être fournies par d'autres capteurs opérant dans le visible, l'infrarouge et les micro-ondes passives.



Cette stratégie d'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival sera conçue de manière à optimiser les interventions en mode opérationnel et à s'intégrer le mieux possible dans le processus de prévision d'Hydro-Québec.

## **4 CONCLUSION**

---

En conclusion à ce rapport d'étape, on peut considérer que le projet se déroule normalement suivant l'échéancier prévu. Aucune modification importante n'a été apportée au projet jusqu'à maintenant et nous ne prévoyons pas en apporter par la suite, tout en demeurant ouverts à toute modification qui pourrait améliorer les résultats. La phase d'acquisition des données s'est très bien déroulée avec des conditions météorologiques très satisfaisantes à chaque campagne de mesure.